

01;05

## Моделирование разрушения упруго-пластических материалов, допускающих фазовый переход

© Е.А. Ноткина, А.В. Чижов, А.А. Шмидт

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 10 февраля 1998 г.

Исследовано разрушение слоя железа, испытывающего полиморфный фазовый переход  $\alpha-\varepsilon$ , взрывной волной в рамках упруго-пластической модели деформации сплошной среды с отколом. Выявлено влияние упругого предвестника на откол.

1. Задача о разрушении материалов, претерпевающих полиморфный фазовый переход под воздействием ударных и взрывных нагрузок, возникает в целом ряде приложений. С точки зрения развития теории механики сплошной среды интерес представляет разработка математического описания распространения волн в конденсированных средах с фазовыми переходами. В настоящее время накоплено большое количество результатов экспериментальных исследований в этой области, но этого не достаточно для построения общей модели явления, необходимой для предсказания картины разрушения и оптимизации взрывных нагрузок. С помощью численного моделирования можно проанализировать особенности распространения волн сжатия и разрежения, в частности, возможности локализации больших растягивающих напряжений в заданных областях. В предыдущей работе [1] описана модель расчета течения железа, испытывающего фазовый переход  $\alpha-\varepsilon$ , учитывающая только пластическую фазу деформации, и представлены результаты расчетов в одномерной постановке, выявляющие три качественно различающихся режима взрыва. В настоящей работе используется модель, учитывающая упругую фазу деформации и оснащенная моделью откола. Это позволило проанализировать роль упругого предвестника в процессе разрушения.

2. Взрыв на поверхности материала вызывает распространение взрывной волны, которая при наличии фазового перехода может иметь сложную структуру и состоять из нескольких волн сжатия и разрежения,

что подтверждается экспериментальными данными. Могут возникать также специфические ударные волны разрежения.

При взаимодействии волн сжатия со свободной границей, образуются вторичные волны разрежения, распространяющиеся внутрь образца. В зависимости от параметров взрыва либо вторичные волны разрежения около свободной поверхности, либо взаимодействие первичных и вторичных волн разрежения в толще материала вызывают растягивающие напряжения, превышающие порог прочности, и происходит откольное разрушение.

Для математического описания процесса используется модель баротропной упруго-пластической среды. Предполагается, что среда однородна и изотропна, время фазового перехода мало. Система уравнений включает уравнения неразрывности, движения и определяющие соотношения для девиатора тензора напряжений. Уравнения записываются в лагранжевых координатах. В качестве определяющих соотношений рассматриваются закон Гука для упругих деформаций и условие пластичности Мизеса. Система замыкается изотермическим уравнением состояния, которое характеризуется наличием точек излома на кривой  $p = p(\rho)$ , соответствующих фазовому переходу и обуславливающих расщепление волн сжатия и разрежения. С наличием фазового перехода связаны также такие эффекты при развитии разрушения рассматриваемых материалов, как гладкий и множественный отколы. Гладкий откол наблюдается при взаимодействии двух встречных ударных волн разрежения. Явление множественного откола связано с многоволновой структурой волн разгрузки.

Существенная нелинейность уравнения состояния и наличие фазовых переходов предъявляют повышенные требования к монотонности конечно-разностной схемы. Поэтому система дискретизируется с помощью TVD-схемы сквозного счета, построенной для уравнений, записанных в инвариантах Римана. Пространственные производные составляются с помощью метода конечных элементов Галеркина. Использовались две модели разрушения: мгновенный откол и модель с интегральным критерием откола, базирующимся на кинетической концепции прочности [2].

3. Расчеты были проведены для одномерного образца железа. Рассматривался фазовый переход  $\alpha-\varepsilon$  (при давлении 13 GPa). Уравнения состояния для  $\alpha$  и  $\varepsilon$  фаз были взяты из работ [3] и [4] соответственно. Моделирование показало, что, в зависимости от начальных параметров,

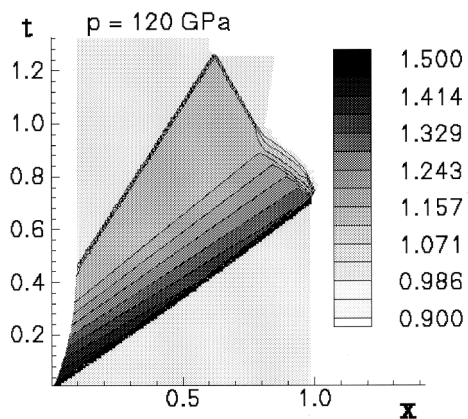


Рис. 1.

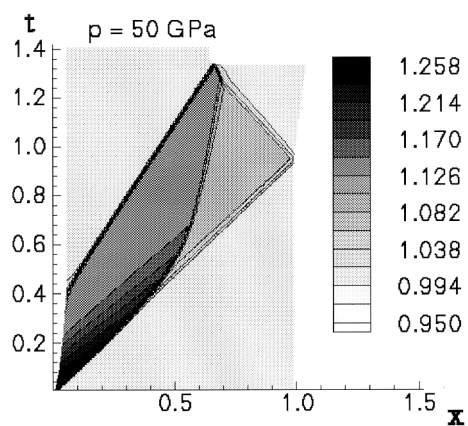


Рис. 2.

существует три качественно различных режима взаимодействия взрывной волны с образцом.

Результаты расчетов представлены на рисунках в виде  $x-t$  диаграмм плотности. (Все величины отнесены к своим характерным значениям).

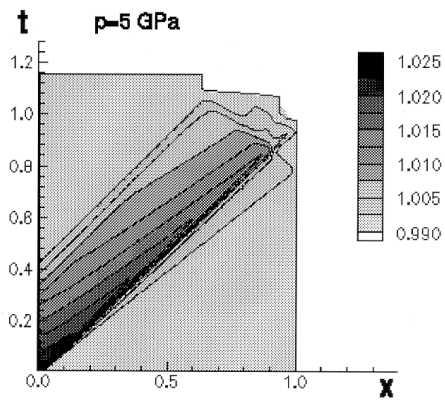


Рис. 3.

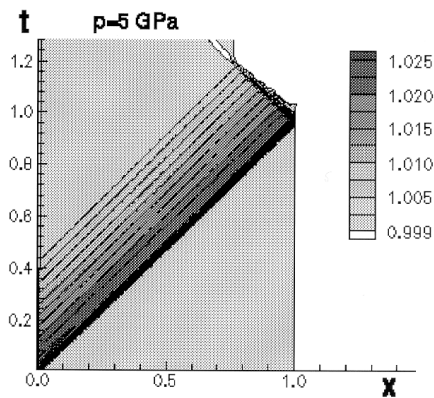


Рис. 4.

Первый режим (рис. 1) реализуется при больших амплитудах взрывной волны ( $p > 50 \text{ GPa}$ ). В этом случае происходит множественный шероховатый откол около правой границы в сильной гладкой волне разрежения и гладкий откол в толще образца при взаимодействии скачков разрежения.

Во втором случае (рис. 2) амплитуда взрывной волны такова, что на фронтах ударной волны сжатия и волны разрежения происходит фазовый переход. При взаимодействии падающего и отраженного скачков разрежения в толще материала образуется гладкий откол.

Третий режим реализуется при начальном давлении на поверхности, меньшем давления фазового перехода (рис. 3). Здесь проявляются особенности распространения волн и картины откола, связанные с упругими свойствами среды, так как в этом случае предел упругости  $\sigma_H$  сравним с амплитудой взрывной волны. Падающая ударная волна и волны разрежения имеют двухволновую структуру. С большей скоростью распространяется упругий предвестник, а за ним пластическая волна. Происходит ослабление падающей ударной волны упругим предвестником волны разрежения. Сравнение результатов данного расчета с результатами моделирования без учета упругих свойств среды (рис. 4) позволяет выявить роль упругого предвестника в развитии откола при малом пределе прочности  $\sigma_0$ . (Представлены результаты при  $\sigma_H = 0.53 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_0 = -0.3 \text{ GPa}$ ). В первом случае откол происходит не только в отраженной волне разрежения, но и при взаимодействии падающей волны разрежения с волной, образовавшейся при взаимодействии упругого предвестника скачка сжатия со свободной поверхностью. Этим объясняется существенное различие толщин откольных слоев при расчете по пластической и упруго-пластической моделям.

## Список литературы

- [1] Чижов А.В., Чистяков В.О., Шмидт А.А. // Письма в ЖТФ. Т. 23. В. 9. 1997. С. 33–39.
- [2] Глушак Б.П., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.
- [3] Альтишулер Л.В. // Успехи физических наук. 1965. Т. 85. В. 2. С. 197–258.
- [4] Альтишулер Л.В., Брусникин С.Е. // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27. № 1. С. 40.